

V. COTECCHIA - G. D'ECCLESIIIS - M. POLEMIO

**LA DINAMICA DEI VERSANTI
DELLA VALLE DEI TEMPLI DI AGRIGENTO**

PRIMO CONVEGNO DEL GRUPPO NAZIONALE DI GEOLOGIA APPLICATA

Giardini Naxos (ME) - 11-15 Giugno 1995

Estratto da
GEOLOGIA APPLICATA E IDROGEOLOGIA
BARI, 1995 - VOLUME XXX - PARTE I

V. COTECCHIA (*) - G. D'ECCLESIIIS (**) - M. POLEMIO (*)

LA DINAMICA DEI VERSANTI DELLA VALLE DEI TEMPLI DI AGRIGENTO

RIASSUNTO

Nel tempo l'antica Agrigento, fulgida città greca, e i successivi insediamenti urbani hanno impegnato, fino ai nostri giorni, una vasta area, oggetto di questo studio. Questa area, dal pregevole interesse archeologico, è caratterizzata dalla presenza di una successione Plio-pleistocenica di natura essenzialmente argilloso-sabbioso-calcarenitica a carattere regressivo. Nella valle del Fiume S. Leone una serie di evidenze morfostrutturali portano a ipotizzare che la dinamica geomorfologica sia controllata da fenomeni del tipo «Cambray and Valley building» dovuti alla completa erosione della placca calcarenitica. Le calcareniti sono interessate da un fitto reticolo di fessure, accentuato da processi di erosione e di dissoluzione. Tale particolare dinamica conduce alla separazione, al distacco e al crollo di blocchi calcarenitici dalla sommità del piastrone su cui sono stati edificati i famosi templi della città greca.

In tale contesto vanno ad inquadrarsi alcuni rilevanti fenomeni franosi verificatisi durante il corrente secolo. Trattasi di tre frane occorse nel 1944, nel 1966 e, infine, nel 1976. La frana del 1976 si è verificata a seguito di una rimobilizzazione causata da intense precipitazioni. Tale conclusione è maturata a seguito di uno studio idrologico-statistico di tipo empirico [15]. Le precipitazioni giornaliere cumulate da 1 a 180 giorni sono state studiate per tutto il corrente secolo, permettendo di determinare il tempo di ritorno di ciascun evento pluviometrico associato alle tre frane studiate. I risultati dell'analisi idrologico-statistica sono stati confermati, mediante la caratterizzazione fisica e idrologica dei terreni del corpo di frana e alcuni semplici calcoli sul movimento delle acque di infiltrazione.

SUMMARY

In the course of time the ancient Agrigento - a superb Greek city - and later urban settlements have been expanding until these days over a vast area - the one described in this study. This is an area of extreme archeological interest which is characterized by the presence of a regressive type of Plio-pleistocenian succession, essentially consisting of clay, sand and calcarenite. From below upwards, one can distinguish a basement from the Miocene and Pliocene epoch followed, in transgression by the Trubi Formation and, further up, by the Mt. Narbone and Agrigento formations. Closing the lithostratigraphic succession, the terraced marine deposits of the Sicilian and Tyrrhenian, and current debris, alluvial and coastal deposits can be observed.

(*) CNR - CERIST, Bari.

(**) Borsista CNR - GNDCI, Università della Basilicata - Potenza.

In the San Leone river valley, a series of morphostructural evidences suggest that here geomorphologic dynamics is very likely controlled by «Canberry and Valley building» type phenomena due to complete erosion of the calcarenite plaque. Among the most outstanding evidences are: a marked westward and eastward rotation of the structural axes, on the right and left side of the torrent respectively, the presence of remoulded clay stripes and levels, also at considerable depth, and sub-horizontal discontinuities. The calcarenites are marked by a thick mesh of cracks made more pronounced by erosion and dissolution processes. Eventually, this kind of dynamics results into the separation and subsequent detachment and collapse of calcarenite blocks from the top of the huge plaque upon which the Greek city's famous Temples were built.

Some remarkable mass movements that occurred during this last century should be viewed in the light of the complex dynamics just described. Especially important are three landslides: two of them inside the area of today's Agrigento, in 1944 and 1966 respectively, and one that occurred in 1976 along the eastern side of the Hill of Temples. The 1976 slide was caused by a remobilization that followed heavy rainfall: this conclusion was reached at the end of an empirical hydrological-statistical study based upon an original method [15]. Daily cumulated rains (1 to 180 days) were studied to cover the whole century, and this approach enables the recurrence interval of each rainfall event associated to the three investigated landslides to be determined. The results of the hydrological-statistical analysis were fully confirmed in the case of the 1976 slide, where it was found that rains are the main causative agent: these results were obtained by means of the physical and hydrological characterization of the soils in the landslide body and some simple calculations concerning the flow of infiltration water.

1. CARATTERI GEOLOGICI DELL'AREA DI STUDIO

L'area in esame è caratterizzata da una successione Plio-pleistocenica di natura essenzialmente argilloso-sabbioso-calcarenitica a carattere regressivo. Al margine settentrionale del territorio analizzato affiorano le formazioni costituenti il basamento della suddetta successione plio-pleistocenica.

Dal basso verso l'alto è possibile distinguere un basamento di età miocenica e pliocenica cui segue, in trasgressione, la Formazione dei Trubi e, verso l'alto, le formazioni di M.te Narbone e Agrigento. A chiusura della successione litostratigrafica si rinvencono i depositi marini terrazzati del Siciliano e del Tirreniano, nonché i depositi attuali detritici, alluvionali e costieri (Fig. 1).

La Formazione dei Trubi è costituita essenzialmente da marne e marne calcaree a globigerine di età Pliocene Inferiore. Tramite un contatto trasgressivo si sovrappone alla Serie gessoso solfifera della quale, almeno nell'area considerata, conserva l'assetto immergente verso Sud-Sud Ovest. Verso l'alto passa gradualmente a depositi argillosi azzurrognoli.

La Formazione di Monte Narbone è costituita da Argille marnose e siltose di colore grigio-azzurro di età riferibile al Pliocene medio-superiore. Tale formazione, con caratteri marcatamente regressivi rispetto ai sottostanti Trubi, per aumento della granulometria passa, verso l'alto, alla Formazione di Agrigento.

La Formazione di Agrigento risulta costituita da una successione di Argille, argille sabbiose, sabbie e calcareniti in alternanza o in eteropia. Le calcareniti, più o meno grossolane, a volte delle vere e proprie biocalciruditi, mostrano livelli a stratificazione incrociata contenenti faune tra cui specie Artica Islandica.

In uno studio del 1957 S. Motta [12] riferisce la copiosa presenza, in un livello sabbioso posto a Nord-Est di Masseria Tamburrello, di esemplari di *Cyprina Islandica*, che datano i livelli della Rupe Atenea di Agrigento al Calabrianiano. In quest'area l'Autore distingue tre livelli calcarenitico-arenaceo distinti, il primo dei quali, quello della Rupe Atenea, procedendo verso Sud-Est si estinguerebbe rastremandosi a becco di flauto nei depositi argilloso-sabbiosi che si interpongono tra i distinti orizzonti calcarenitici. Il secondo livello calcarenitico sarebbe quello che costituisce il terreno di fondazione dei templi e il terzo affiorerebbe, a lembi isolati dall'erosione, come ad esempio in corrispondenza di Poggio Meta, a sud dell'abitato o della Chiesa Arabo Normanno di S. Nicola.

Oltre che nella zona anzidetta, i depositi pleistocenici affiorano anche in corrispondenza del Cozzo Mosè, in sinistra del fiume S. Leone; ivi risulta presente un'unico orizzonte calcarenitico, come accertato con rilievi diretti.

I depositi calcarenitici costituiscono una sinclinale asimmetrica con asse orientato da W-NW a E-SE, il cui fianco settentrionale risulta considerevolmente più inclinato di quello meridionale (Fig. 2A).

I depositi calcarenitici risultano interessati da un fitto reticolo di fessure e da piccole faglie a debole rigetto verticale.

Nell'area a Sud della Collina dei Templi e di Cozzo Mosè, in corrispondenza di una serie di rilievi, posti tra 35 e 80 m s.l.m., sono presenti depositi marini terrazzati di natura conglomeratica, correlabili con una superficie di deposizione con una generale pendenza verso Sud-Est, riferibili al Siciliano [12]. È da segnalare altresì una copertura conglomeratico-argilloso-sabbiosa, eterogenea, poligenica ed eterometrica, che è presente alla sommità dei depositi calcarenitici in corrispondenza della collina dei Templi. Tale copertura potrebbe essere collegata ad una fase deposizionale post-calabrianica di ambiente di transizione, oramai in gran parte erosa.

In corrispondenza delle incisioni dei fiumi S. Leone e Drago (Hypsas) una estesa copertura alluvionale ricopre i terreni del fondovalle. Le alluvioni, specie a Sud dell'area dei Templi, mostrano terrazzamenti e divagazioni segno di notevoli modifiche

nell'andamento dei corsi d'acqua a seguito di importanti fasi di alluvionamento e/o di modifiche del livello di base. Ad Est di Masseria Tamburrello, immediatamente a valle della strada di collegamento tra la S.S. 115 e la passeggiata archeologica, sono presenti depositi alluvionali con spessori di circa una decina di metri, segni di una intensa fase di alluvionamento, forse con brevi episodi lacustri, avvenuta a monte della stretta morfologica esistente tra lo stretto colle su cui sorge la chiesetta di S. Calogero e il Tempio di Giunone Lucina.

Lungo il litorale sono presenti depositi sabbiosi costituenti la duna attuale e la spiaggia.

2. GEOMORFOLOGIA DELL'AREA

Il territorio comprendente la Valle dei Templi di Agrigento mostra una evoluzione morfologica condizionata pesantemente dai caratteri strutturali dell'area e dovuta essenzialmente a fenomeni erosivi e a movimenti di massa, anche di grande proporzioni.

Il territorio esaminato è in gran parte caratterizzato da un paesaggio a cuestas, determinato dall'erosione selettiva effettuata dagli agenti esogeni e dall'erosione lineare espletata dai corsi d'acqua che determinano corsi e valli cataclinali, come il fosso S. Biagio, valli monoclinali e anacinali, sia pure appena accennate (Fig. 2A e B). Tra le forme erosive si individuano forme calanchive e da erosione eolica quali tafoni in parete, alla base dei livelli calcarenitici della formazione di Agrigento.

Tra le morfologie fossili in smantellamento si nota l'ampia scarpata che borda la collina dei Templi, con alla base i depositi marini terrazzati testimoniando la paleosuperficie deposizionale del mare pleistocenico, riferibili secondo il MOTTA [12], al Siciliano nei pressi di Poggio Musello e Poggio Lampo e al Tirreniano per la spianata che dalla base della collina dei Templi arriva al mare.

Lungo il versante nord-orientale della Rupe Ateanea rilevanti scorrimenti e colate interessano la pendice, così come fenomeni di creeping. Alcuni segni di tale dinamica sono visibili in corrispondenza del Tempio di Demetra, laddove sono visibili rotazioni di talune strutture murarie in senso opposto all'inclinazione del versante.

Nella valle del Fiume S. Leone, in corrispondenza della stretta tra Masseria Tamburrello e località S. Calogero, una serie di evidenze morfostrutturali portano a sospettare che la dinamica geomorfologica

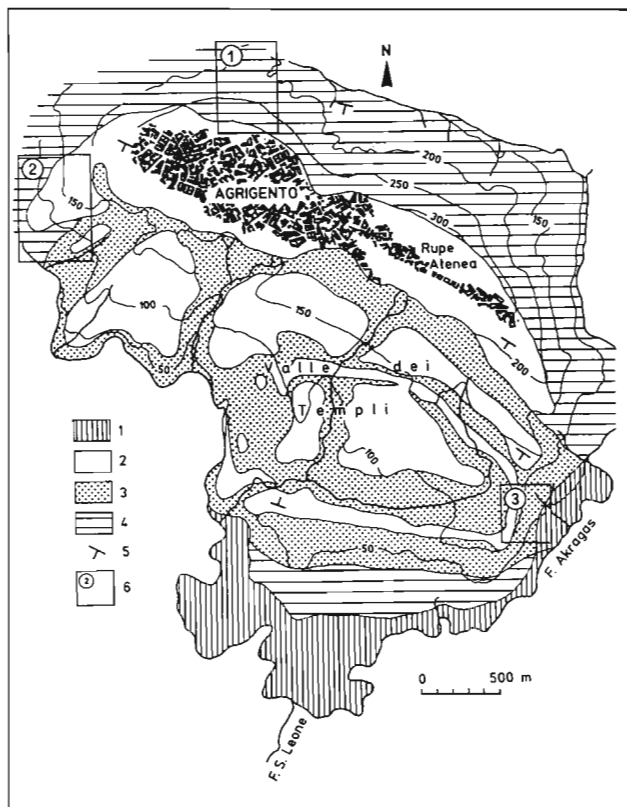


Fig. 1 - Carta geologica schematica e ubicazione delle frane studiate: 1) alluvioni; 2) calcareniti; 3) argille e argille sabbiose; 4) argille e marne; 5) immersione e inclinazione degli strati 6) frane studiate, ① frana del 1944, ≠ frana del 1966, ③ frana del 1976.

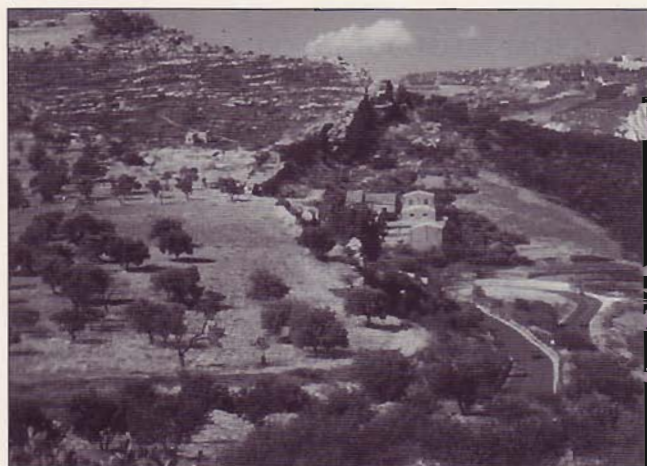
Schematic geological map and location of investigated landslides: 1) Alluvia; 2) Calcarenites; 3) Clays and sandy clays; 4) Clays and marls; 5) Strike and dip direction of strata; 6) Investigated landslides ① 1944 slide, ≠ 1966 slide, ③ 1976 slide.

gica sia controllata da fenomeni del tipo «Cambery and Valley building» dovuti alla completa erosione della placca calcarenitica, anche se tale aspetto è tutt'altro che certo. Tra le evidenze più rilevanti una marcata rotazione degli assi strutturali verso Ovest ed Est, rispettivamente in destra e sinistra del torrente, la presenza di livelli e fasce rimanegiate nelle argille, anche a profondità rilevanti, e di discontinuità suborizzontali.

In tutto questo tratto le calcareniti sono interessate da un fitto reticolo di fessure orientate secondo direttrici NE-SW e WNW-ESE. Tale sistema di discontinuità è accentuato da processi di erosione e di dissoluzione operate dalle acque meteoriche che si infiltrano nel terreno; inoltre, le discontinuità a direttrici Nord-Est -Sud-Ovest risultano via via

più evidenti man mano che ci si avvicina al bordo orientale della placca su cui sorgono Agrigento e i Templi, a seguito di fenomeni di decompressione e di richiamo verso il vuoto.

Tale particolare dinamica, enfatizzata dall'azione dilavante e disgregatrice delle acque di ruscellamento, conduce alla separazione e al successivo distacco e al crollo di blocchi calcarenitici dalla sommità del piastrone su cui sono stati edificati i templi. Il processo di demolizione si esplica attraverso il concorso di più azioni destabilizzanti esogene in corrispondenza di «inviti» tettonici preesistenti; in pratica, in corrispondenza di fessure di genesi tettonica, l'infiltrazione delle acque meteoriche le conduce ad un progressivo allargamento, sia a causa di processi di alterazione chimica sia, e



A



B



C



D

Fig. 2 - Fotografie della frana del 1976: A) paesaggio a cuestas; B) veduta su masseria Tamburello; C) foto aerea prima della frana, ripresa nel 1973; D) foto area dopo la frana, del 1977.

Photograph of 1976 slide : A) "cuestas" landscape; B) A view of Tamburello farm; C) Aerial photograph of slide before 1973; D) Aerial photograph taken after the slide, in 1977.

soprattutto, attraverso l'azione meccanica di asportazione del fino. Crescenti quantità di acqua si infiltrano in corrispondenza della fessura provocando, tra l'altro, la saturazione del livello di sabbie sciolte alla base del bancone calcarenitico e il ram-mollimento delle argille azzurre di base. Contemporaneamente, in corrispondenza della faccia del versante esposta all'erosione eolica e delle acque ruscellanti, viene più rapidamente smantellato il livello sabbioso sciolto posto alla base delle calcareniti, determinando la formazione di forme di sottoescavazione, quali tafoni, particolarmente evidenti lungo il versante orientale della collina, e l'aggetto del bancone di calcarenite. Il contemporaneo verificarsi di tali fenomeni erosivi mina profondamente la stabilità del bancone calcarenitico e conduce al ribaltamento di porzioni sempre nuove dello stesso.

La dinamica morfologica dianzi descritta risulta continua non solo nel tempo, ma anche nello spazio in quanto diffusa, a diversi stadi della sua evoluzione, lungo tutto il bordo della collina che ospita i templi di Agrigento. Anche il tempio di Giunone e quello della Concordia sono interessati dagli stessi fenomeni.

In tale complessa dinamica dei versanti vanno ad inquadrarsi alcuni rilevanti fenomeni franosi verificatisi durante il corrente secolo. Trattasi di tre frane: due occorse nell'area dell'attuale Agrigento, il primo il 28/2/1944, in corrispondenza del versante settentrionale della collina su cui è attualmente sita la città, e il secondo, occorso il 19/7/1966, lungo il versante occidentale di Agrigento, in corrispondenza del quartiere Addolorata e, infine, una occorsa il 25/12/1976, lungo il versante orientale della collina dei Templi (Fig. 1). Per i tre fenomeni di frana sono stati raccolti tutti i dati disponibili, generalmente via via meno copiosi per gli eventi meno recenti.

3. I MOVIMENTI FRANOSI DEL 1944 E DEL 1966

In corrispondenza del versante sud-occidentale della collina di Agrigento il versante risulta costituito da argille marnose, in varia misura limose, riferibili alla Formazione di Monte Narbone su cui trasgrediscono i depositi argilloso-sabbioso-calcarenitici della Formazione di Agrigento.

Il bancone calcarenitico ivi risulta interessato da una rilevante fratturazione ed è caratterizzato da una potenza variabile da pochi metri a circa 30 metri.

Il 19/7/1966 un'area di circa 45 ha fu coinvolta da un movimento franoso che, nell'arco di circa 30 minuti, secondo quanto riportato da CROCE et Alii (1980) [8], ha interessato il bancone calcarenitico in corrispondenza del quale sono stati misurati, lungo una rilevante frattura, spostamenti orizzontali quasi sempre superiori a quelli verticali, con direzione prevalente del movimento verso S-SW. Notevoli furono i danni causati ai fabbricati del quartiere Addolorata, nonché alla linea ferroviaria Agrigento-Porto Empedocle, nonché ad un ponte sul fiume Drago.

In base a quanto riportato da CROCE [8], il movimento avrebbe avuto uno spessore non minore di circa 40 - 50 metri, desumibile dalla seguente affermazione contenuta nel testo del citato lavoro: «... Il movimento ha interessato interamente il banco di calcarenite, di spessore variabile da qualche metro a circa 30 m... ...le argille del calabriano di spessore pari a qualche decina di metri e, probabilmente, le argille plioceniche», ed uno sviluppo longitudinale e trasversale rispettivamente di circa 1000 m e circa 450 m. In tali ipotesi il movimento deve ritenersi caratterizzato da una dinamica morfoevolutiva complessa, del tipo ribaltamento-scorrimento rototraslazionale-colata.

In condizioni geologiche simili a quelle del versante occidentale della collina su cui è edificata la città di Agrigento risulta essere il versante settentrionale. In corrispondenza di tale versante, il 28/2/1944, un'area rilevante, compresa tra il duomo e la linea ferroviaria, fu coinvolta in un fenomeno franoso che danneggiò gravemente la Piazza Bibbirria e la linea ferroviaria stessa. Pochi sono gli elementi ricavabili dalla letteratura consultata su tale fenomeno, ad oggi risultano visibili le opere di regimazione idraulica eseguite sul versante, a valle della piazza, lungo il versante.

In base ai pochi elementi tutt'oggi visibili sulla pendice, sembra potersi ricondurre la dinamica di tale ultimo fenomeno a quella della frana del 1966.

4. CARATTERI GEOMORFOLOGICI DELLA FRANA DEL 25 DICEMBRE 1976

Il versante orientale della valle dei Templi, in destra del Fiume S. Biagio (Akragas) è modellato interamente nella Formazione di Agrigento (Fig. 3). Le porzioni elevate del versante sono caratterizzate dall'affioramento di rocce calcarenitiche riferibili al 2° livello calcarenitico della Formazione di Agri-

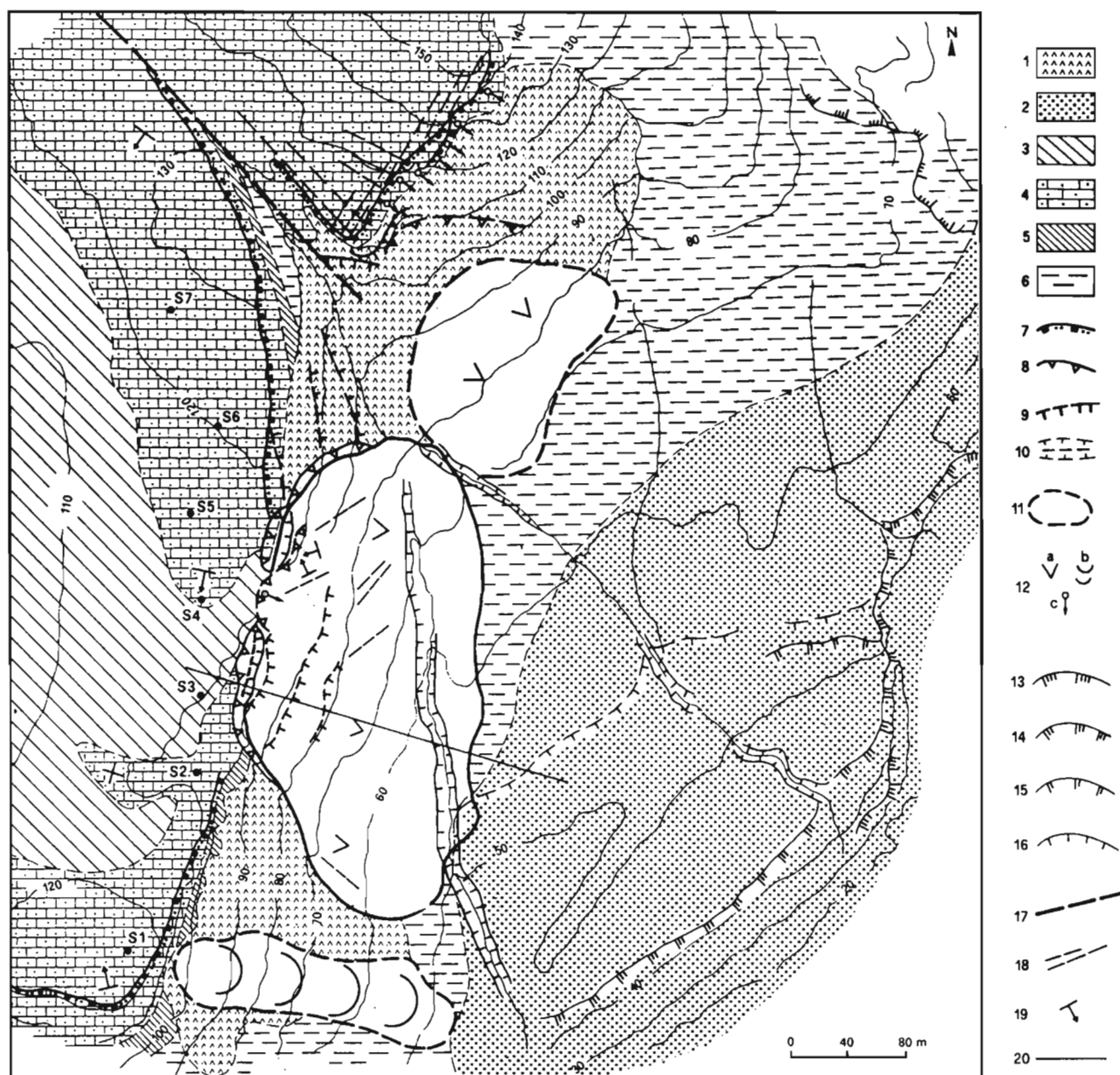


Fig. 3 - Carta geomorfologica della frana del 1976: 1) detriti di falda; 2) depositi alluvionali; 3) coperture recenti di natura conglomeratico-sabbiosa-argillosa; 4) calcareniti e calciruditi organogene; 5) sabbie medio-grossolane giallastre; 6) argille limose e sabbiose grigio-azzurre; 7) bordo di terrazzo in arretramento per crollo; 8) scarpata principale di frana, attiva se a tratto continuo; 9) scarpata secondaria di frana; 10) trenches; 11) corpo di frana, attivo se a tratto continuo; 12) movimento tipo a) scorrimento, b) colata e c) crollo; bordo di terrazzo alluvionale 13) del IV ordine, 14) del III ordine, 15) del II ordine e 16) del I ordine; 17) faglia; 18) frattura; 19) giacitura degli strati; 20) traccia della sezione.

Geomorphological map of 1976 landslide: 1) Slope debris; 2) Alluvial deposits; 3) Recent conglomerate-sandy-clayey covers; 4) Organogenic calcarenites and calcirudites; 5) Medium-to-coarse yellowish sands; 6) Silty and sandy grey-blue clays; 7) Receding terrace edge following collapse; 8) Main landslide scarp, active if marked with a continuous line; 9) Secondary landslide scarp; 10) Trenches; 11) Landslide body, active if marked with a continuous line; 12) a) Slide, b) Flow, c) Collapse-type movements; 13) 4th order; 14) 3rd order; 15) 2nd order and 16) 1st order edge of alluvial terrace; 17) Fault; 18) Fracture; 19) Attitude of strata; 20) Section outline.

gento, con potenza compresa tra 8 e 18 metri, che, a letto, passano a sabbie giallastre medio-fini, pressochè sciolte, di potenza compresa tra 2 e 6 metri. Al di sotto delle sabbie sono presenti le facies argilloso-marnose e argilloso-sabbiose grigio-azzurre della Formazione di Agrigento (Fig. 4).

Il versante da tempo è soggetto ad una intensa degradazione conseguente all'erosione sia areale che concentrata e a movimenti di massa che si esplicano essenzialmente come crolli e ribaltamenti frontali di blocchi calcarenitici per «appel au vide», come scorrimenti rotazionali e roto-traslazionali e, subordinatamente, come colate.

La citata attività erosiva svolge un ruolo affatto trascurabile, la presenza di un livello di sabbie da poco cementate a sciolte alla base del bancone calcarenitico fa in modo che l'erosione, tanto eolica che idrica, specie in occasione di particolari eventi meteorici, sia in grado di modificare considerevolmente la stabilità del costone roccioso e di innescare o accelerare il crollo di blocchi calcarenitici.

L'analisi aereofotogeologica ha consentito di aclarare il quadro geomorfologico del versante in corrispondenza di due momenti, uno antecedente al franamento del 1976, descritto da immagini del 1973, e uno successivo all'accadimento franoso, relativo al 1977 (Fig. 2C e D).

Nel novembre 1973 il versante risultava interessato (Figg. 3 e 5) da tre corpi di frana due dei quali, il primo posto a valle di Masseria Tamburello ed il secondo del tempio di Giunone Lucina, in

gran parte erosi, i cui segni morfologici risultano malamente visibili tutt'oggi. In posizione centrale rispetto ai due franamenti antichi, un esteso e composito corpo franoso, benchè in parte anch'esso inattivo all'epoca, mostrava chiaramente i suoi caratteri morfologici e palesava, nei pressi del coronamento, i segni premonitori dell'innescio di una nuova fase diastrofica.

Tale corpo franoso principale, la cui scarpata correva alla base del gradino morfologico delimitante il bancone calcarenitico di sommità del versante, si sviluppava longitudinalmente per circa 130 metri e, trasversalmente, per complessivi 180 metri. Il fianco destro del franamento interrompeva la continuità laterale di un corpo franoso secondario, preesistente, con scarpata principale sviluppantesi tra le quote 84-86 m e sviluppantesi longitudinalmente per circa 120 metri e trasversalmente, per la porzione non riattivata dal più recente franamento, per circa 80 metri.

Lo spessore del corpo di frana principale è da ipotizzarsi non maggiore di 18-22 metri al massimo, con superficie di scorrimento modellata nella facies argilloso-marnoso-sabbiosa grigio-azzurra della Formazione di Agrigento.

In base al rapporto D/L [17], dove D è lo spessore del corpo di frana ed L è la lunghezza della corda definita dalla superficie di scorrimento, calcolato lungo la sezione di Fig. 5, risultato sempre compreso tra 0,15 e 0,33, il fenomeno è classificabile come uno scorrimento rotazionale.

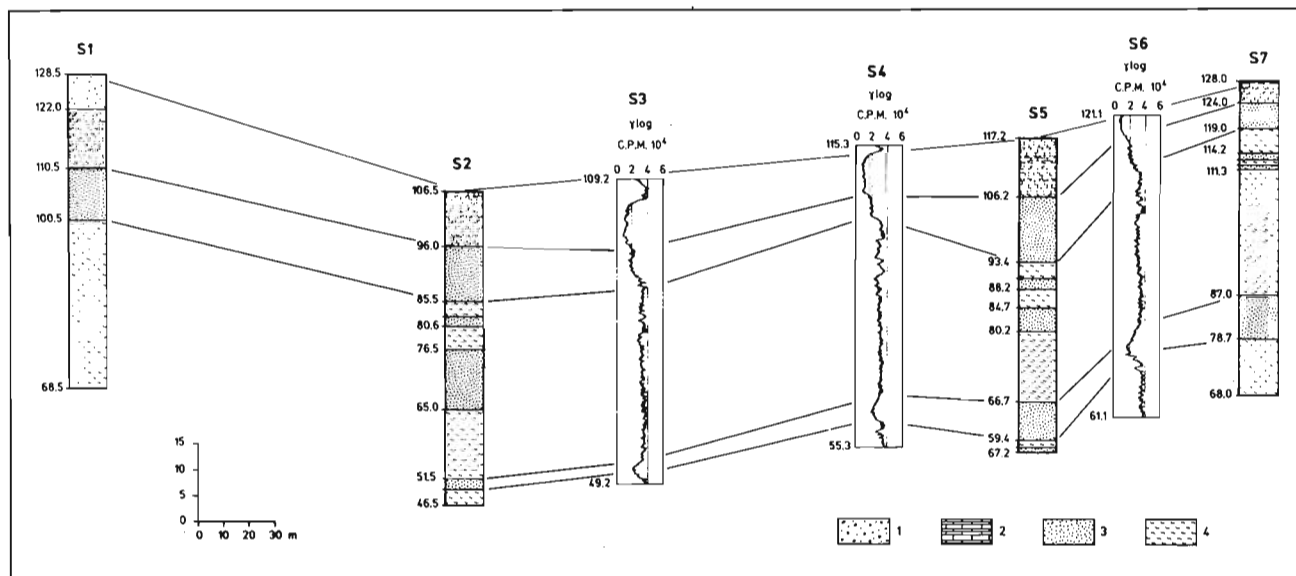


Fig. 4 - Sezione stratigrafica schematica: 1) depositi eterogenei conglomeratico-ghiaiosi in abbondante matrice sabbioso-argillosa; 2) calcareniti, biocalciruditi e sabbie grossolane con ciottoli e resti fossili di colore ocra; 3) sabbie medie e medio fini, a luoghi limose di colore giallastro poco cementate; 4) argille limose e sabbiose di color grigio-azzurro.

Schematic stratigraphic section: 1) Heterogeneous conglomerate-gravel deposits in an abundant sandy-clay matrix; 2) Calcarenites, biocalcirudites and coarse sands with pebbles and fossil remains, ochre in colour; 3) Medium and medium-to-fine sands, locally silty, yellowish and poorly cemented; 4) Silty and sandy clays, grey-blue in colour.

In corrispondenza del coronamento del franamento erano presenti due evidenti rotture di neoformazione, la prima di queste, corrispondente ad una frattura da trazione ad andamento subverticale con un rigetto apprezzabile del blocco di valle, era situata immediatamente a monte della fascia laterale destra del coronamento della frana; la seconda rottura, corrispondente ad un piccolo trench, era situata lungo il prolungamento del ciglio sinistro della corona di frana. Tali rotture delimitavano già l'area che sarebbe franata nel dicembre del 1976.

Il 25/12/1976, in occasione di intense precipitazioni, un nuovo movimento franoso si innescava sul versante orientale della collina dei Templi di Agrigento, esso in parte rimobilizzava lo scorrimento rotazionale già esistente al 1973, testè descritto, e in parte mobilizzava nuove porzioni di versante.

Lo scorrimento rotazionale preesistente si rimobilizzava, lungo la preesistente superficie di scorrimento che, sul lato di monte, affiorava proprio al piede della parete calcarenitica. In conseguenza

dello scalzamento al piede subito dalla parete calcarenitica, una consistente porzione della stessa, delimitata da una già detta preesistente frattura da trazione al margine superiore destro dell'antica frana, si ribaltava con rotazione al piede della scarpata. Un'ulteriore porzione di versante, sottostante un trench in sinistra del coronamento dell'antico franamento, si mobilizzava in corrispondenza di una superficie di neoformazione più profonda, determinando, tra l'altro, un vistoso rigonfiamento al piede del versante.

Il rapporto D/L è risultato, anche in questo caso, compreso nel campo tipico degli scorrimenti rotazionali. Il meccanismo con cui tale fenomeno si è esplicato è chiaramente complesso ed è costituito da una combinazione di scorrimento rotazionale e ribaltamento frontale.

Una superficie di terreno di circa 43 ettari risultavano complessivamente coinvolti dal franamento e di questi circa 28 ha ricadevano nell'ambito del preesistente scorrimento rotazionale.

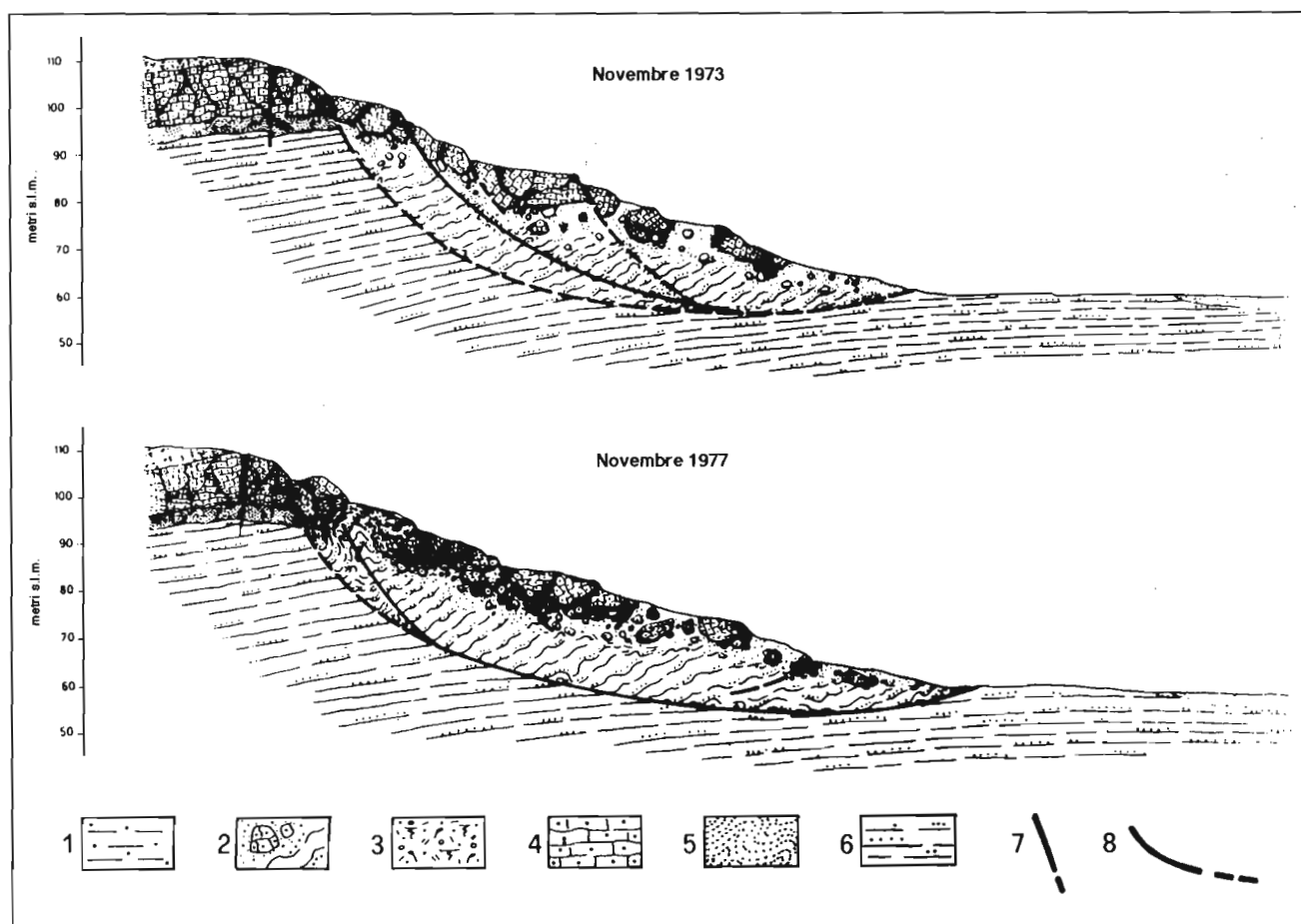


Fig. 5 - Sezioni geologiche prima e dopo la frana del 1976: 1) alluvioni; 2) detrito di frana; 3) depositi recenti; 4) calcareniti; 5) sabbie; 6) argilla; 7) frattura; 8) superficie di scorrimento.

Geological sections before and after the 1976 landslide: 1) Alluvia; 2) Landslide debris; 3) Recent deposits; 4) Calcarenites; 5) Sands; 6) Clay; 7) Fracture; 8) Slip surface.

La dinamica del movimento franoso può essere sintetizzata in tre momenti, di cui il primo è rappresentato dalla rimobilizzazione dello scorrimento rotazionale preesistente sul versante e il secondo e il terzo rispettivamente dal ribaltamento frontale di un blocco consistente di calcarenite, già distaccatosi in epoche precedenti in corrispondenza di una rilevante frattura già visibile al 1973, e dall'innescare di un movimento di neoformazione, in sinistra dell'antico e preesistente scorrimento a valle di un piccolo e preesistente trench.

Da tutto quanto suddetto discende che la dinamica evolutiva complessiva del versante è caratterizzata da una risalienza lungo il versante dei fenomeni franosi e da un susseguirsi di rimobilizzazioni a lato delle quali si producono piccoli fenomeni di neoformazione che, spesso, si individuano in corrispondenza di preesistenti fessurazioni, esaltate anche da una intensissima attività erosiva.

Attualmente il versante è nelle medesime condizioni descritte nel 1973, infatti nuove rotture si sono prodotte in corrispondenza del bancone calcarenitico alla sommità del versante a destra e a sinistra del coronamento della frana del 1976 e il corpo di frana mostra i segni di piccoli ma continui movimenti verso valle, come è possibile notare da alcune nuove lesioni apertesi di recente sul manto stradale della provinciale per Agrigento.

5. MODELLO DI ANALISI PRECIPITAZIONI - FRANE

Come già compreso da Almagià [2], le precipitazioni meteoriche possono risultare sia una causa provocatrice delle frane, quando particolarmente eccezionali, che predisponente.

Un approccio completo è possibile se si matura una conoscenza globale del comportamento dei terreni costituenti il pendio. A tal fine si dovrà acquisire i dati che permettano di ricostruire le modalità di deflusso superficiale e sotterraneo, focalizzando, in questo secondo caso, l'attenzione sulla filtrazione sia nella zona satura che in quella non satura.

La grande complessità dei fenomeni significativi per la stabilità dei pendii, dovuti al deflusso sia superficiale che profondo delle acque, hanno spinto allo studio di modelli di simulazione dei fenomeni che si svolgono sia sopra che sotto il suolo. Questo tipo di modello, denominato «modello completo di versante», è stato descritto sulla base

delle sue differenti possibilità applicative [6]. Alcune proficue esperienze sono oramai state realizzate, in particolare ricorrendo a simulazioni bidimensionali del flusso superficiale e profondo, in condizioni sature e non [4].

Qualora siano indisponibili dati tali da permettere la definizione di modelli completi di versante, preziose indicazioni vengono fornite dai modelli idrologici [6]. Si tratta generalmente di modelli empirici di analisi della relazione precipitazioni-frana. I modelli idrologico-statistici studiano il carattere di eccezionalità dell'evento meteorico associabile alla frana mediante lo studio dei massimi valori assunti dalla variabile idrologica prescelta [15].

Il carattere di eccezionalità dell'evento pluviometrico associato alla frana si può esprimere, grazie a tali modelli, in termini di tempo di ritorno. Tale risultato permette di stabilire con quale ciclicità statistica il pendio è stato soggetto a condizioni idrologiche analoghe a quelle esaminate. Nel caso delle due frane che hanno interessato l'abitato di Castronuovo S.A., poste nell'Appennino meridionale, la metodologia ha permesso di valutare e quantificare il differente ruolo svolto dagli agenti della dinamica del versante [9].

Su aree limitate, a rilevante valore socio-economico, come quelle urbanizzate o storico-artistiche, si può pervenire così alla definizione di un semplice strumento di prevenzione e allarme, di cui il nucleo potrebbe essere una stazione intelligente di monitoraggio in continuo dei parametri termopluviometrici.

5.1 La statistica dei valori estremi

Lasciando per brevità ai lavori in bibliografia l'approfondimento degli aspetti teorici e statistici, nel seguito sono state applicate due funzioni della distribuzione della probabilità [15].

La funzione GEV (Generalized Extreme Value), di cui la funzione di GUMBEL [10] è un caso particolare, è univocamente definita dai parametri di scala, di posizione e di forma.

MATALAS et al. [11] hanno evidenziato che le tradizionali funzioni di distribuzione delle probabilità, quali quella di Gumbel e la stessa GEV, sono incapaci di soddisfare la *condizione di separazione*. La condizione si manifesta mediante il rilevamento di pochi valori, tanto eccezionali e tanto significativamente più grandi degli altri da sembrare statisticamente separati dai restanti. Tali valori sono noti come *outliers*, ovvero come *estranei* [14].

Per recepire tale effetto si prevede il ricorso a distribuzioni di probabilità definite mediante la sovrapposizione di due o più distribuzioni, ciascuna relativa ad una sola popolazione riconoscibile. Un esempio di tali funzioni è rappresentata dalla funzione di distribuzione della probabilità definita mediante un modello a doppia componente, denominato TCEV (Two Component Extreme Value) [16]. Vista la complessità dell'argomento, rimandando all'ampia bibliografia [3, 16], si consideri che la TCEV nasce dalla sovrapposizione di due funzioni, applicate alla stessa serie di dati, e richiede la determinazione di quattro parametri.

Dal punto di vista teorico, quanto più aumenta il numero di parametri delle parent distribution utilizzate, tanto più strettamente si rappresenta il fenomeno studiato. D'altra parte, il numero limitato di dati disponibili rende le funzioni sempre più imprecise e inefficienti al crescere del numero di parametri; inoltre crescono le difficoltà connesse alla determinazione del valore dei parametri stessi [16]. Si dovrà quindi procedere per gradi, valutando l'attendibilità del risultato [14 e 15].

L'uso della funzione GEV è oramai molto diffuso e sostituisce quello della funzione di Gumbel, ma è di limitata efficacia nei casi in cui si manifesti la condizione di separazione. In tali casi si giustifica il ricorso alle miscele di funzioni quali la TCEV. Rossi et al. [16] suggeriscono di verificare l'esistenza di dati estranei mediante il calcolo di due coefficienti statistici, già calcolati e studiati nel caso di Agrigento [21, 22].

Entrambe queste funzioni, la GEV e la TCEV, permettono di condurre uno studio a carattere regionale, potendo così evidenziare eventuali caratteri di omogeneità della variabile studiata, in zone e sottozone della regione in studio [18, 24].

6. GLI EVENTI DI PIOGGIA-FRANA STUDIATI

Nel territorio di Agrigento le condizioni climatiche sono determinate dal regime delle precipitazioni, di tipo marittimo o mediterraneo, e da quello delle temperature, di tipo moderato.

La modesta piovosità e l'elevata temperatura determinano ad Agrigento un clima semiarido, con efficienza termica da terzo mesotermico e con elevata concentrazione estiva, con un surplus idrico annuo di 108 mm, distribuito da dicembre ad aprile [14 e 18].

Lo studio delle relazioni tra precipitazioni e frane trova riscontro in alcuni casi di fenomeni franosi verificatisi nel territorio di Agrigento in Sicilia [13 e 14].

Già nel 1921, era stato evidenziato come in Sicilia il peculiare alternarsi di periodi aridi a stagioni molto piovose induce una forte relazione tra piogge e frane [7]. Diverse frane, nel corso del secolo, si sono verificate ad Agrigento: il 28/2/1944 (*evento 1*), il 19/7/1966 (*evento 2*) e il 25/12/1976 (*evento 3*); inoltre, due frane, verificatesi nel corso del gennaio 1907 e del gennaio 1919 (CRINÒ, 1921), precedute da piogge, sono note ma non sufficientemente per essere trattate in questa sede. In taluni anni la piovosità è stata tale da determinare ad Agrigento delle vere e proprie alluvioni, come accaduto sul finire dell'anno 1976 [1], nel corso del quale si è verificato l'evento 3, l'unico occorso in un anno particolarmente piovoso, tanto da coincidere con il massimo assoluto (Fig. 6).

Se si considera la relazione empirica studiata da CANCELLI e NOVA [5] tra il fenomeno meteorico, caratterizzato dai parametri di intensità e di durata, e l'evento di frana, si può tracciare la Fig. 7. Per quanto attiene ai tre eventi di Agrigento, si può ipotizzare preliminarmente che l'esistenza di una relazione tra precipitazioni meteoriche e frane si affievolisce al passare dall'evento 3 all'1 e da questo al 2.

Confortati da tali primi risultati, sono state calcolate le variabili $PC_{n,j}$, piogge cumulate per n pari a 1, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180 giorni consecutivi, utilizzando le piogge giornaliere relative a tutto il periodo di osservazione e con j numero intero che rappresenta i giorni. Dalle serie di dati generate sono stati estratti, anno per anno, i valori massimi $PCMAX_n$.

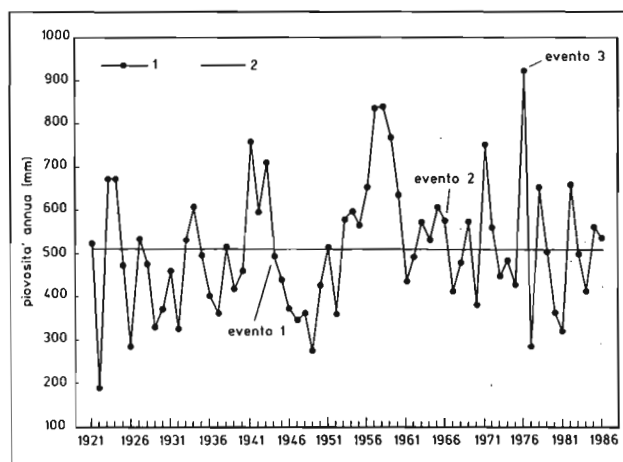


Fig. 6 - Piovosità dal 1921 al 1986 ad Agrigento: 1) piovosità annua; 2) piovosità media nel periodo; da [15].

Rainfall at agrigento 1921-1986: 1) Annual rainfall; 2) Average rainfall during the same years, from [15].

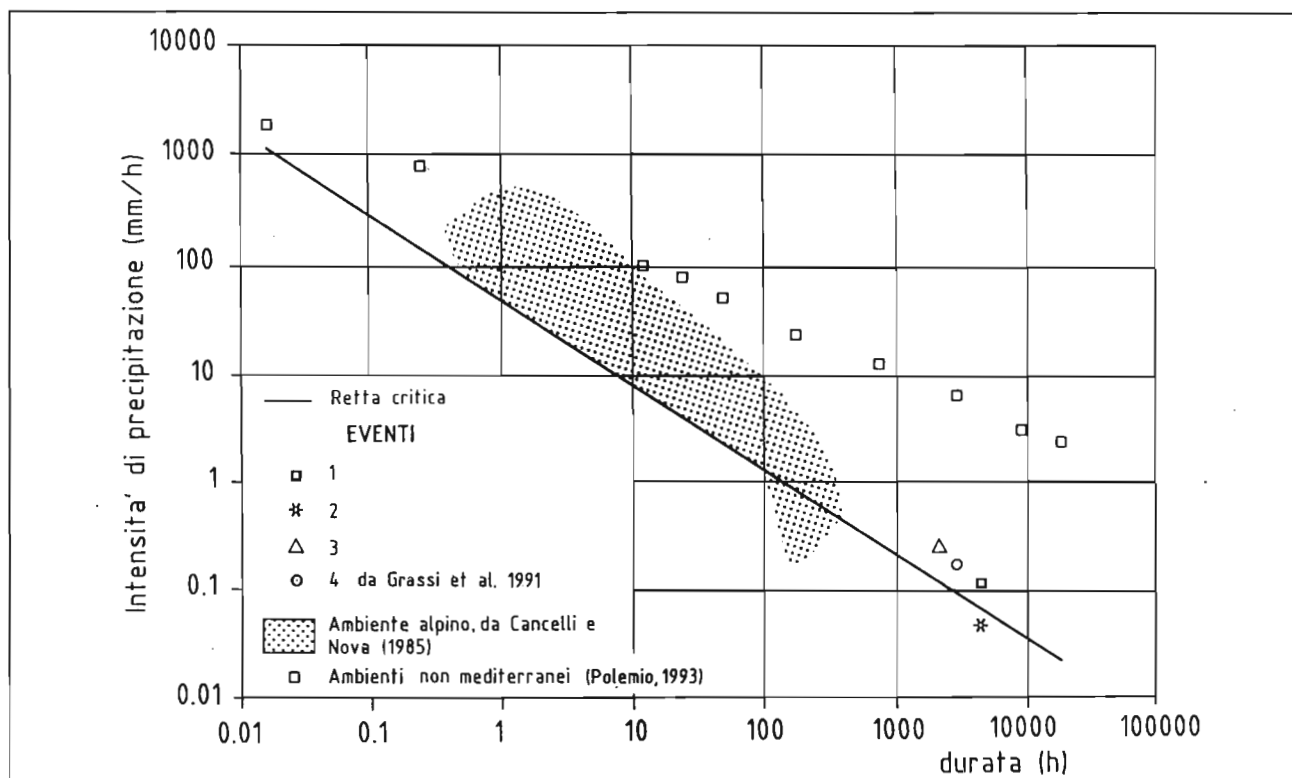


Fig. 7 - Relazione tra intensità e durata degli eventi meteorici verificatisi contemporaneamente a frane: 1) evento 1; 2) evento 2; 3) evento 3, da [15] modificata.

Intensity vs. Duration of rainfall events occurring simultaneously with the landslides: 1) 1st event; 2) 2nd event; 3) 3rd event, from [15], modified.

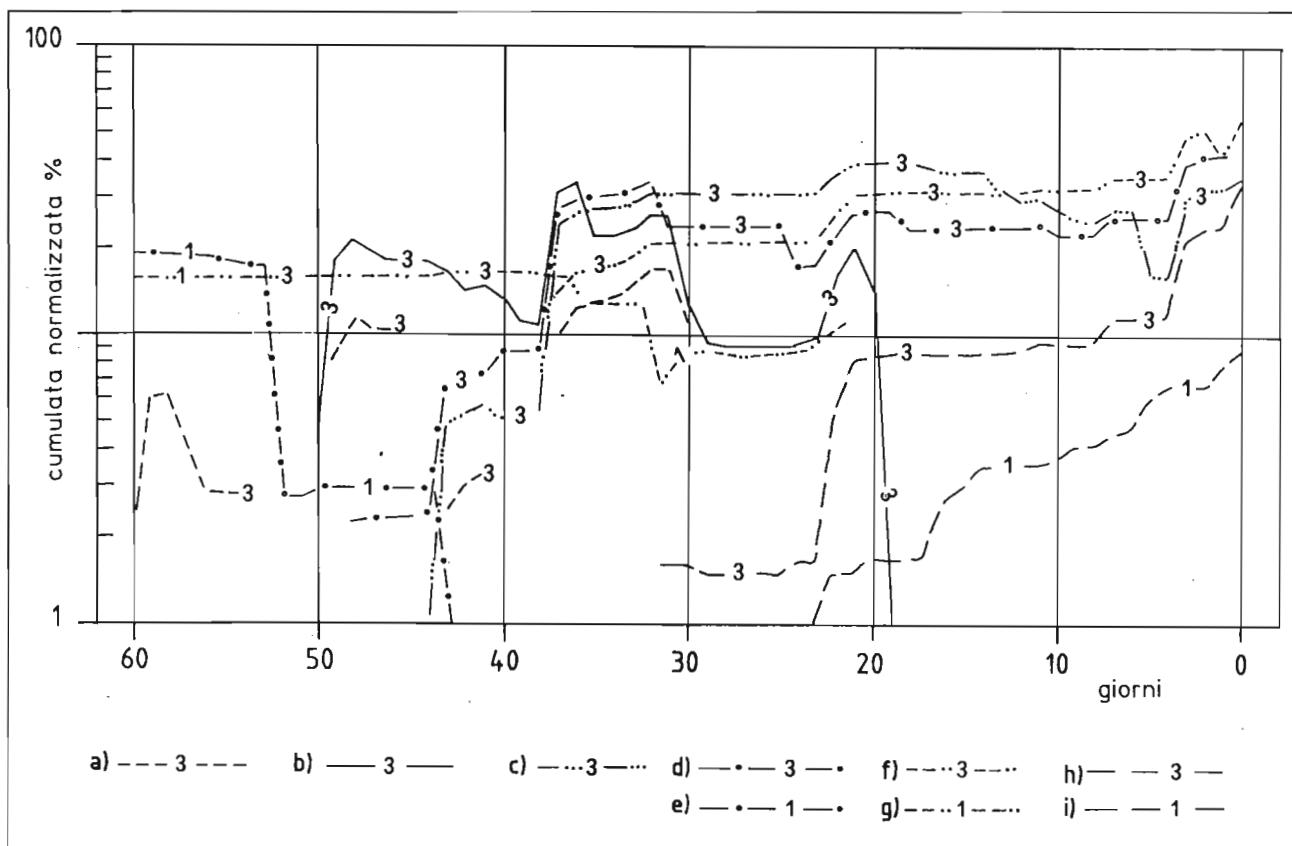


Fig. 8 - Idrogrammi delle cumulate normalizzate: a), b), c), d), f) e h) $n = 20, 30, 60, 90, 120, 180$ d, terzo evento di frana e), f) e i) $n = 90, 120, 180$ d, primo evento.

Hydrograms of generalized cumulative rainfall: a), b), c), d), f) and h) $n = 20, 30, 60, 90, 120, 180$ d, third landslide event; e), f) and i) $n = 90, 120, 180$ d, first event.

Una visualizzazione significativa e rapida dell'andamento delle precipitazioni nei 60 giorni prima di ciascun evento è fornita dalla Fig. 8; in cui sono rappresentate le variabili cumulate normalizzate

$$H_{n,j} = (PC_{n,j} - PCMAX_{n,MED}) / (PCMAX_{n,MAX} - PCMAX_{n,MIN}) \%$$

dove MIN, MED, e MAX rappresentano rispettivamente i valori minimi, medi e massimi di ciascuna serie di valori annuali $PCMAX_n$.

Si noti che le sole cumulate normalizzate H relative al primo evento a comparire nell'intervallo significativo sono quelle per n da 120 a 180; solo per $n = 180$ H assume valori positivi e crescenti all'approssimarsi della frana. Per il secondo evento di frana le cumulate normalizzate sono sempre minore di 1. Nel caso del terzo evento le H sono risultate rappresentabili nell'intervallo prescelto qualsiasi fosse n . Si noti che per $n > 60$ le H sono fortemente crescenti prima della frana: il massimo, pari a 55, viene raggiunto dalla H_{120} .

Tale tipo di rappresentazione fornisce quindi risultati speditivi non in contrasto con quanto emerso

dalla discussione della Fig. 7 e, come si vedrà, più coerenti con quanto accertato al termine dello studio idrologico, fornendo peraltro, un valido strumento per confrontare graficamente le singole cumulate relative a un sito, e, tenendo conto delle caratteristiche del campione di dati delle PC_n , potrebbe essere utile per confrontare eventi di pioggia-frana relative a siti diversi. Inoltre la rappresentazione grafica proposta da POLEMIO [15] ha il vantaggio, rispetto alla Fig. 6, di visualizzare il gradiente della piovosità nel tempo, nei giorni immediatamente prima della frana: un persistente gradiente negativo prima dell'evento di frana dovrebbe infatti indurre a escludere una relazione di causa-effetto tra una determinata PC_n e la frana stessa.

Il confronto grafico tra le frequenze calcolate mediante le funzioni di probabilità individuate e le frequenze dei valori misurati e i test statistici hanno dimostrato nel caso di Agrigento che per le cumulate da 1 a 20 giorni siano più attendibili le funzioni TCEV [13 e 14]. Le funzioni GEV nei casi suddetti hanno mostrato una limitata significatività fisica mentre le funzioni TCEV hanno evidenziato una maggiore capacità descrittiva degli eventi più rari; il test di Kolmogorov-Smirnov ha indicato livelli di significatività mediamente mag-

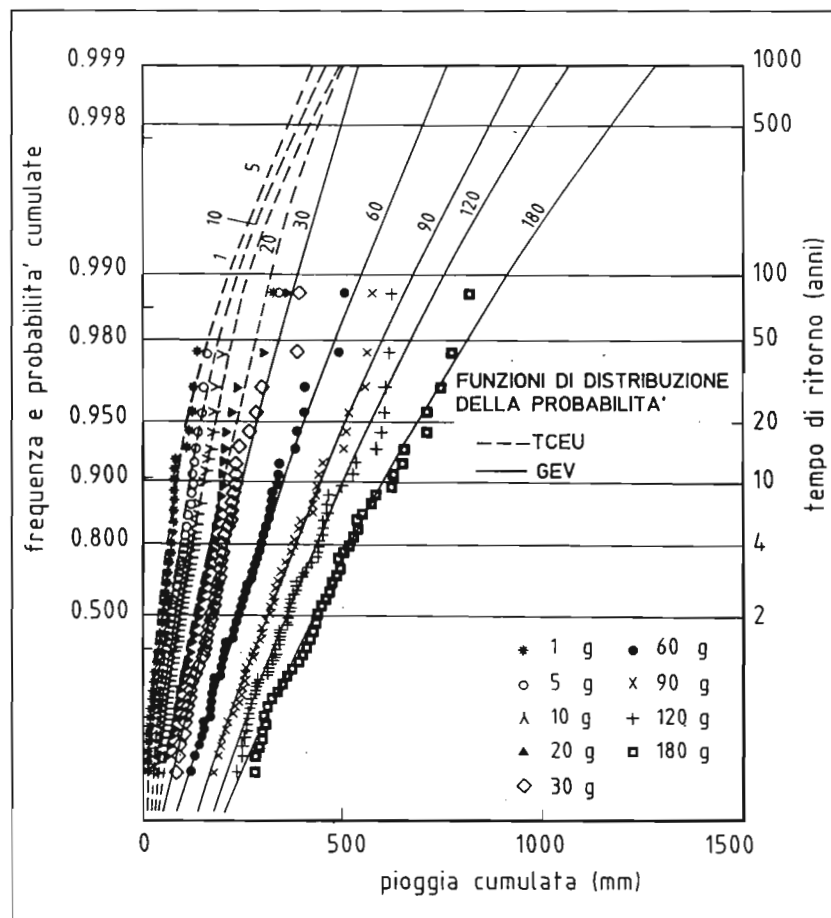


Fig. 9 - Frequenza cumulata e probabilità cumulata secondo le funzioni di distribuzione selezionate: tipo TCEV per le cumulate 1, 5, 10, e 20 giorni, e GEV per le 30, 60, 90, 120, e 180 giorni.

Cumulated frequency and cumulated probabilities according to selected distribution functions: TCEV type for 1, 5, 10, and 20 days cumulated rains, and GEV type for 30, 60, 90, 120, and 180 cumulated days.

giori del 10 % per le funzioni TCEV relative alle cumulate da 1 a 20 giorni. E' stato infatti dimostrato che la straordinaria eccezionalità dell'evento piovoso verificatosi il 28/9/1971 determina la condizione di separazione per la variabile cumulata per 1 giorno e influenza le cumulate fino a 20 giorni, in modo da rendere più significativa per queste variabili la funzione TCEV [14].

Scelte le più significative, è possibile tracciare le 9 funzioni di distribuzione della probabilità e confrontarle con le frequenze misurate (Fig. 9).

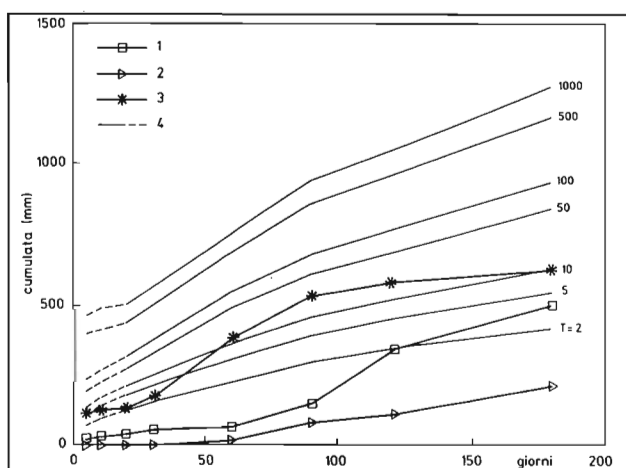


Fig. 10 - Confronto tra le curve di pioggia cumulata relative a diversi tempi di ritorno T e le curve di pioggia cumulata associate ai tre eventi, calcolate mediante le funzioni TCEV e GEV selezionate: (1) evento 1, (2) evento 2, (3) evento 3, (4) curve di pioggia di tempo di ritorno T calcolate secondo le GEV (TCEV dove tratteggiato).

Cumulated rain curves for different recurrence intervals t vs. Cumulated rain curves for the three events calculated by means of selected TCEV and GEV functions: (1) 1st event, (2) 2nd event, (3) 3rd event, (4) rain curves for recurrence interval t calculated according to GEV (TCEV if hachured).

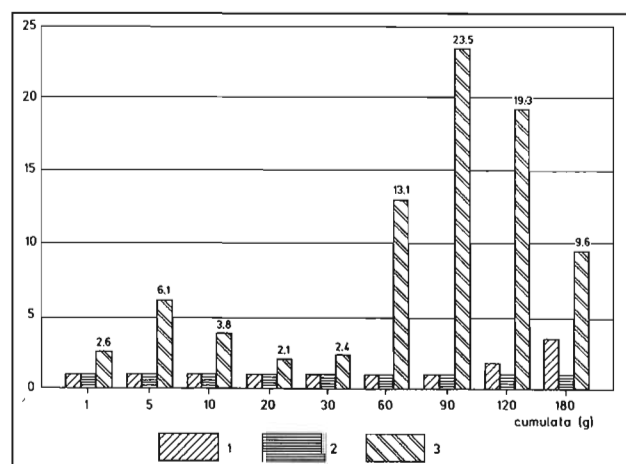


Fig. 11 - Tempo di ritorno, secondo le funzioni GEV e TCEV prescelte, delle cumulate: relative a (1) evento 1, (2) evento 2, (3) evento 3.

Recurrence interval according to selected GEV and TCEV functions of cumulated rains for (1) 1st event, (2) 2nd event, (3) 3rd event.

Sulla base delle funzioni di distribuzione della probabilità di ciascuna cumulata, sono state determinate le curve di pioggia cumulata (Fig. 10) ed è stato determinato il tempo di ritorno di ciascuna cumulata relativa a ciascun evento di frana (Fig. 11).

E' così possibile quantificare quanto innanzi emerso solo in modo qualitativo:

- le cumulate relative al secondo evento sono assolutamente ordinarie;

- le cumulate relative al primo evento non hanno particolare rilevanza, raggiungendo, al più, un tempo di ritorno di circa 3 anni nel solo caso delle cumulate per 180 giorni;

- la ciclicità statistica delle cumulate relative al terzo evento è molto significativa per le relazioni tra piogge e frane, il periodo piovoso efficace si estende per 90-120 giorni; avendo raggiunto la cumulata per 90 giorni un tempo di ritorno di 24 anni.

7. LE VICENDE IDROLOGICHE DEL 1976

L'eccezionale piovosità dell'anno 1976 non è dovuta alle ordinarie precipitazioni verificatesi tra gennaio e aprile, che chiusero l'inverno e l'anno idrologico '75-'76 (Fig. 12). Il sopraggiungere della stagione estiva, particolarmente calda e secca a queste latitudini, ha, come ogni anno, esaurito per evapotraspirazione le riserve idriche accumulate nel ter-

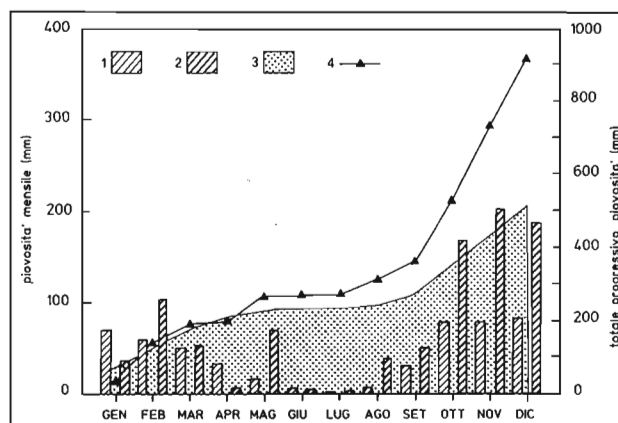


Fig. 12 - Piovosità annua media e del 1976: 1) piovosità mensile media, 2) piovosità mensile nel 1976, 3) totale progressivo della piovosità mensile media, 4) totale progressivo della piovosità mensile del 1976.

Average annual rainfall and 1976 rainfall: 1. Average monthly rainfall, 2. Monthly rainfall in 1976, 3. Progressive total of average monthly rainfall, 4. Progressive total of monthly rainfall in 1976.

reno, annullando infiltrazione e ruscellamento. Solo a settembre, la ripresa delle precipitazioni può aver favorito le prime modeste infiltrazioni nel corpo franoso reso arido. Ciò permette di ritenere non significative, per la frana del 1976, le variabili idrologiche definite in un intervallo di tempo superiore ai 120 giorni. Le infiltrazioni, iniziate a settembre e sempre più significative al trascorrere del tempo, sono state inizialmente favorite da fessure e fratture apertesi, durante la stagione arida, negli strati più superficiali del terreno, dovute al notevole calo del contenuto d'acqua.

Dal punto di vista granulometrico i terreni costituenti il corpo di frana sono delle argille sabbiose e, secondariamente, delle sabbie argillose, classificabili come argille inorganiche a plasticità medio-alta. La porosità totale varia dal 33 al 47%, con un valore medio del 40%. In prima approssimazione, sulla base delle caratteristiche granulometriche, la porosità efficace n_e può essere stimata pari al 10%. Le prove di assorbimento eseguite nel corpo franoso, generalmente a più di 10 m dal p.c., hanno permesso di accertare una permeabilità nel complesso di circa $8 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Se si considera che il corpo franoso è potente circa 20 m, che al termine della stagione arida è da considerarsi del tutto non saturo, si può determinare in prima approssimazione il tempo necessario perchè l'acqua che inizi a infiltrarsi nelle suddette condizioni dal piano campagna determini un incremento della pressione neutra. L'infiltrazione avviene in un mezzo insaturo e quindi bifasico, in cui l'entrata dell'acqua è possibile nella misura in cui esce aria o la stessa si comprime. Il controflusso dell'aria, diretta verso il piano campagna, provoca una variazione nel tempo della permeabilità del terreno all'acqua, in funzione della geometria e delle condizioni di saturazione del mezzo.

È noto che in tali condizioni la permeabilità si riduce sostanzialmente, fino a un terzo del valore in condizioni sature [3]. Assumendo un valore della permeabilità costante e pari un terzo a quello accertato in condizione di saturazione, risulta che sono necessari $t_0 = 87$ giorni di infiltrazione dal piano campagna per determinare un primo incremento della pressione neutra sulla superficie di scorrimento.

Generalmente, quando si hanno basse intensità di pioggia, la velocità di infiltrazione massima è maggiore dell'intensità di pioggia e quindi tutta l'acqua disponibile filtrerà nel terreno; con intensità di pioggia elevate il terreno non sarà in grado di assorbire tutta l'acqua che cade e parte di essa ruscellerà. Esiste dunque un'intensità limite che il terreno può assorbire e dipende dalla permeabilità del terreno. Considerando quanto detto, si può in prima approssimazione considerare

una permeabilità ridotta ad un terzo a causa del moto dell'aria.

L'intensità massima di infiltrazione nel corpo franoso in condizioni insature è, in tale ipotesi, pari a 10 mm/h. Nel corso del 1976 la massima intensità oraria di pioggia è stata registrata il 18 novembre ed è stata pari a 51 mm/h. Su base giornaliera l'intensità di pioggia scende a valori molto più piccoli, non superiori a 3 mm/h, per tutto il 1976. Si può quindi ritenere che sostanzialmente le piogge non siano mai state, nel corso del 1976, tanto intense da far sì che l'infiltrazione efficace raggiungesse i valori massimi consentiti dalle caratteristiche del terreno.

L'aumento Dh del livello di falda dovuto ad un evento pluviometrico può essere messo in relazione con l'altezza d'infiltrazione minima nel terreno h' e con la porosità efficace n_e tramite la relazione:

$$h' = Dh n_e,$$

per cui posto $Dh = 10$ m,

$$\text{risulta } h' = 1 \text{ m};$$

poichè il terreno può assorbire massimo 10 mm/h, occorreranno non meno di 100 ore di pioggia, cioè circa 4 giorni. In conclusione il tempo minimo necessario affinché l'acqua raggiunga la falda posta ad una profondità di 20 m e ne incrementi il livello di 10 m può essere stimato in:

$$t_p = t_0 + 4 g = 91 g$$

In verità, tale tempo è sovrastimato dato che sono stati trascurati gli effetti delle fratture presenti negli strati più superficiali del corpo di frana, causate dalla stagione arida. Il calcolo di t_p , afflitto da alcune approssimazioni, determina comunque un ordine di grandezza che è in ottima relazione con l'esito dello studio idrologico-statistico, dimostrando la coerenza, l'affidabilità e l'utilità di tale approccio, i cui risultati sono assolutamente indipendenti da qualsiasi indagine di campagna.

8. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La dinamica dei versanti della Valle dei Templi è risultata fortemente influenzata dalle vicende tettoniche recenti e dai fenomeni erosivi. In tale quadro, generalmente complesso, si verificano frequenti fenomeni di instabilità dei versanti.

Sono emerse alcune differenze tra i tre fenomeni franosi studiati, anche in termini di geometria del corpo di frana. La dimensione longitudinale della frana del 1966 è risultata particolarmente rilevante rispetto ai restanti due casi, viceversa maggiore è risultata la dimensione trasversale nella frana del 1976; inoltre la prevalenza nella frana del 1966 degli spostamenti orizzontali su quelli verticali è risultata compatibile con un cinematisma scorrimento-colata mentre per l'evento del 1976 la prevalenza degli spostamenti verticali è risultata conseguente ad una dinamica del movimento franoso essenzialmente rotazionale.

Lo studio ha evidenziato la complessità e la diversità dei fenomeni che regolano gli effetti delle precipitazioni meteoriche sulla stabilità dei versanti, individuando le caratteristiche principali degli eventi meteorici potenzialmente significativi in relazione al tipo di frana.

Lo studio idrologico-statistico delle piogge cumulate e la caratterizzazione preliminare dei processi di infiltrazione nel corpo di frana hanno fornito risultati significativi nel caso delle frane di Agrigento. Sia la frana del 1966, che non ha mostrato alcuna relazione con le precipitazioni, che la frana del 1944, verificatasi durante un periodo piovoso che ha determinato pressioni neutre non certo eccezionali, devono essere associati a fattori della dinamica dei versanti diversi dalle precipitazioni, così come descritto in questo lavoro. La frana del 1976 di Agrigento è stata l'unica, di quelle studiate, indotta da un rilevante fenomeno meteorico, la cui eccezionalità si esprime mediante un tempo di ritorno di circa 25 anni. Il legame di causa-effetto determinato con il metodo idrologico-statistico proposto è stato confermato per via fisica, mediante il calcolo dei tempi di infiltrazione nel corpo di frana del 1976.

Il ricorso alle cumulate normalizzate ha fornito un rapido strumento grafico che ha indicato la qualità dei risultati infine emersi, fornendo inoltre un utile strumento per confrontare eventi piogge-frane relativi a vari siti.

Analizzando i dati pluviometrici fino al 1994, anche inediti, è emerso che dal 1977 non si sono verificati anni particolarmente piovosi. Le cumulate delle piogge non hanno più raggiunto valori comparabili a quelli verificatisi durante la frana, per quanto riguarda le cumulate significative, ovvero per 30 e più giorni.

LAVORI CITATI

- 1 - AGNESI (1989): *Aspetti della dinamica dei versanti e della conservazione del suolo in Sicilia*. Convegno Sicilia e Terzo Mondo, Risorse idriche e difesa del suolo, Quaderni del Sud, 1, 115 -131.
- 2 - ALMAGIÀ R. (1910): *Studi geografici sulle frane in Italia*. Società Geografica Italiana, Vol. XIV, Roma.
- 3 - BRUSTKERN E MOREL-SEYTOUX (1970): *Analytical treatment of two-phase infiltration*. Journal of Hydraulics Division.
- 4 - CALVER A. (1988): *Calibration, sensitivity and validation of a physically-based rainfall-runoff model*. Journal of Hydrology, 103, Elsevier, Amsterdam.
- 5 - CANCELLI A., NOVA R. (1985): *Landslides in soil and debris cover triggered by Valtellina (Central Alps- Italy)*. Pro. IV int. Conf. and field workshop on landslides, Tokyo.
- 6 - CASCINI L., VERSACE P. (1986): *Eventi pluviometrici e movimenti franosi*. Agi, XVI Convegno Nazionale di Geotecnica, Bologna 14-16 maggio.
- 7 - CRINÒ S. (1921): *Distribuzione geografica delle frane in Sicilia e periodi di maggiore frequenza dei franamenti*. L'Universo, II, 6, pp. 421 - 466, Firenze.
- 8 - CROCE A., DE MIRO E., FENELLI G. B., LIGUORI V., MORANDI R. NOCILLA N., PACE E., PELLEGRINO A., ROSSI DORIA P. (1980): *La città di Agrigento e la valle dei Templi. Questioni di stabilità del territorio e di conservazione dei monumenti*. XIV Convegno nazionale di Geotecnica, 28 - 31 ottobre, Firenze, pp. 109 - 124.
- 9 - D'ECCLESIS G., GRASSI D., MERENDA L., POLEMIO M., SDAO F. (1991): *Evoluzione Geomorfologica di un'area suburbana di Castronuovo S'Andrea (PZ) ed incidenza delle piogge su alcuni movimenti di massa*. Geologia Applicata e Idrogeologia, Vol XXVI, Bari.
- 10 - GUMBEL E. J. (1958): *Statistics of extremes*. Columbia University Press, New York.
- 11 - MATALAS N. C., SLACK J. R., WALLIS J. R. (1975): *Regional Skew in Search of a Parents*. Water Resour. Res., Vol 11, No. 6.
- 12 - MOTTA S. (1957): *Nota descrittiva geologica della tovoletta Agrigento (271-IV NE), con particolare esame della serie gessoso-solfifera in essa esistente*. Boll. Serv. Geol. Ital., LXXVIII, 4-5.
- 13 - POLEMIO M., DRAGONE V. (1992): *Studio idrologico del ruolo delle precipitazioni meteoriche nei fenomeni di instabilità dei versanti*. Rapporto tecnico interno 21, CNR - CERIST, Bari.
- 14 - POLEMIO M., DRAGONE V. (1993): *La condizione di separazione nello studio delle piogge cumulate in relazione alle frane*. Rapporto tecnico interno 22, CNR - CERIST, Bari.
- 15 - POLEMIO (1993): *Le precipitazioni meteoriche ei fenomeni di instabilità dei versanti in ambiente mediterraneo*. Medit, n. 4/93, Bologna.
- 16 - ROSSI F., FIORENTINO M. e VERSACE P. (1984): *Two Component Extreme Value distribution for flood frequency analysis*. Water Resour. Res., 20(7), pp. 847-856.
- 17 - SKEMPTON A. W. e HUTCHINSON J. (1969): *Stability of natural slopes and embankment foundations*. Città del Messico, 291-340.
- 18 - THORNTWHAITE C. W. e MATHER J. R. (1957): *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. Drexel Inst. of Climat., 10, 323, Centerton.